

一种基于转发优先及流量分级的 无线传感器网络退避算法*

余庆春¹, 谭 翀²

(1. 湖北经济学院 信息管理学院, 武汉 430205; 2. 武汉数字工程研究所, 武汉 430074)

摘要: 基于无线传感器网络的特点, 提出了一种新的基于转发优先和流量分级的退避算法, 该算法根据节点自身可获取的网络信息将网络流量判定为不同的级别, 并依此改变退避窗口的大小; 该算法还赋予转发节点一定的信道竞争优势, 使得当前的通信业务可以优先地进行下去。通过理论分析和仿真实验, 证实该算法能够有效地降低节点冲突率和额外的能量开销, 减少传输延时, 提高系统吞吐量, 从而提高无线传感器网络的性能。

关键词: 无线传感器网络; 退避算法; 流量分级; 转发优先

中图分类号: TP393.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)05-1846-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.065

Novel backoff algorithm for WSN based on preferentially transmitting and different traffic levels

YU Qing-chun¹, TAN Chong²

(1. Information Management College, Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China; 2. Wuhan Digital Engineering Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to the specialty of WSNs, this paper proposed a new backoff algorithm based on preferentially transmitting and different traffic levels. This scheme defined different traffic levels according to the available messages that nodes could obtain, and adjusted the backoff window; the scheme also gave a priority to the transmitting nodes, which let the current transaction can be preferentially processed. Simulations prove that the proposed algorithm can reduce the collisions effectively, depress the extra energy consumption, achieve a lower latency, and heighten the system throughputs, provides a better performance of WSNs.

Key words: wireless sensor networks; backoff algorithm; traffic levels; preferentially transmitting

无线传感器网络是由随机部署在监测区域内的大量传感器节点组成, 通过无线通信的方式形成的一个多跳自组织的网络系统, 其目的是协作的感知、采集和处理感知对象的信息, 并将其发送给观察者。它是一种无处不在的感知技术, 被广泛地应用于军事、环境、医疗、智能家居等诸多领域。

无线传感器网络是一种无中心节点的全分布式系统, 使用多跳、对等的通信模式, 其无线信道和能量资源非常有限, 因而高性能的 MAC 协议是具有挑战性的关键技术之一。

现有的 CSMA/CA 系列的 MAC 协议已经可以较好地解决信道争用时的隐藏终端/暴露终端^[1]以及提高吞吐量等问题; 而针对无线传感器网络的高能量效率的需求, 研究者加入了各种低占空比 (duty circle)^[2]策略, 能够较好地减少空闲侦听所带来的能量损耗。在增强 QoS 方面, 大部分提出的 MAC 协议在一定程度上都是建立在 IEEE 802.11 DCF 的基础上, 并且集中在退避算法、帧间隔、最大/最小竞争窗口、最大帧长度等方面, 其中, 退避算法是考虑的重点^[3]。

1 相关研究工作

退避机制作为 MAC 协议的重要组成部分, 对 MAC 协议以

及网络的性能都有很大影响。自 20 世纪 70 年代开始, 就有大量的文献在研究退避算法。退避机制是无线网络 MAC 层协议中使用的一种解决节点冲突的方法, 它决定了节点每次在发送报文前所需要经历的退避时间, 目的是在多节点竞争接入同一信道时, 保证接入的有效性, 达到合理利用系统资源的目的。退避算法就是维护节点退避计数器的算法, 它的目标就是赋予节点适当的退避时间, 以正确反映节点周围的信道竞争状况^[4]。算法既要尽量降低各节点间的冲突概率, 又要避免因退避时间过长而降低信道利用率, 同时还要保证各节点公平地访问信道。在分布式环境中, 这些要求对退避算法的设计提出了挑战。

现有的基于无线传感器网络的 MAC 协议大多沿用了无线网络标准协议 (IEEE 802.11、IEEE 802.15.4 等) 中的退避算法; 包括 IEEE 802.11 和 IEEE 802.15.4 标准在内的许多无线协议都采用二进制指数退避 BEB (binary exponential backoff) 算法^[5]。每当节点发送失败, 退避时间加倍, 直到最大门限为止; 每次发送成功, 退避时间降至最小值。BEB 算法总是有利于最近一次发送成功的节点, 且不能随网络状况而改变, 造成了资源浪费, 带来了不公平的信道竞争机制。

收稿日期: 2011-08-25; **修回日期:** 2011-10-17 **基金项目:** 湖北省教育厅科技处优秀中青年人才项目 (Q20102206)

作者简介: 余庆春 (1980-), 女, 湖北鄂州人, 讲师, 博士, 中国计算机学会会员, 主要研究方向为计算机网络、无线传感器网络、无线通信协议 (fishhead_516@126.com)。

在 IEEE 802.11 的基础上,许多研究者提出了多种改进方案。Bharghavan 等人^[6]提出了一种乘法增加线性减小算法 MILD(multiplicative increase linear decrease),该算法设置了 α 和 β 两个参数,即发生冲突时,退避时间以 α 倍数增加;发送成功时,退避时间以 β 线性递减。MILD 算法可使竞争窗口变化得较平滑,降低了再次冲突的发生率,吞吐量略优于 BEB。但是如果节点数目较多,线性递减会让退避时间较慢地进入合理值。

在 BEB 和 MILD 算法的基础上,研究人员还提出了很多改进的退避机制^[7~11],这些机制都是根据不同的需求来使退避时间的取值以乘法、线性或两者结合的方式增加或减少。

文献[12]提出了 P-MAC(priority-based fair MAC)算法。在 P-MAC 中,加入了基于负载权重参数 f ,对具有较高负载权重的节点给予较高的信道接入概率,P-MAC 协议在公平性和吞吐量性能方面均得到大幅提高。

何宏等人^[13]还在退避算法中引入了传输概率^[14],并且当节点在传输概率大的情况下才改变退避时间的值,该算法能够在高负荷网络环境下,更高效地减小数据帧的冲突次数,提高无线信道的利用率。文献[15]则在 BEB 算法基础上增加了一个临时退避(interim backoff, IB)的参数,其值随机取自于实际退避时间的 10%~40%,该算法可以在一定程度上减少不合适的长退避时间,从而增加网络的吞吐量。

由于无线传感器网络多跳的通信模式,并且在相当大一部分的应用中其流量具有突发性的特点,现有的退避算法存在着以下几个方面不足:

a) 竞争窗口滑动缓慢,对于流量变化大的业务,需要过渡较长的时间才能达到最佳值,造成资源的浪费;

b) 转发节点在当前活跃节点中缺乏信道访问优势,没有降低在多跳过程中报文的冲突概率,降低了传输效率并带来传输延迟;

c) 某些算法需要记录实时网络信息并加以计算,增加了协议的复杂度。

针对上述不足,本文提出了一种基于转发优先和流量分级的退避算法(preferentially transmitting and different traffic levels, PTTL)。

2 基于转发优先和流量分级的退避算法

节点通过侦听信道的状态以及 RTS/CTS 消息来判断当前网络流量级别,并且对转发节点赋予较小的竞争窗口,增大其竞争信道的成功率。所以 PTTL 算法主要包含流量分级和转发优先这两个策略。

1) 流量分级

传感事件并不是均匀出现,常常带有一定的突发性,所以网络流量也不是处于一个长期稳定的指标。为了减少空闲侦听带来的能量损耗,传感器节点在网络中周期性地休眠和侦听,节点在侦听过程中所收集的网络信息可以在一定程度上反映当前网络的流量水平。

在 PTTL 算法中,根据节点可以侦听到的网络信息,将网络流量分为以下三个级别:

a) 空闲节点如果侦听到当前信道空闲,则认为当前网络流量极小;

b) 节点连续成功竞争到信道,并且成功发送报文,则认为

当前网络流量较小;

c) 节点在一次或多次退避结束后,还是竞争信道失败,则认为当前网络流量较大。

上述三个级别的判定不需要复杂的网络参数,实现上比较简单,并且可以在很大程度上反映真实的流量情况。其相对应的退避策略如下:

a) 节点处于侦听状态时,侦听到当前网络有空闲时隙,减小退避窗口;若连续侦听到空闲时隙,则可说明当前网络流量很小,活跃节点数量极少,为了减少资源浪费,节点必须快速地减小退避窗口。具体做法是将退避窗口以连续侦听空闲时隙数量的立方数下降。

b) 如果节点连续多次竞争到信道,并且成功地发送报文,则说明当前信道竞争不激烈,活跃节点数量不多,那么节点可以快速地缩小竞争窗口,减少退避时间。具体做法是将退避窗口以连续成功竞争信道次数的平方数下降。

c) 节点多次竞争信道失败,则说明当前信道竞争很激烈,活跃节点数量较多,为了避免冲突,将退避窗口乘性增加,乘性因子取连续竞争信道失败的次数加 1。但是当连续竞争信道失败的次数超过了最大重传次数时,节点的退避窗口将重置为初始窗口,避免节点始终以最大的退避窗口来竞争信道。

2) 转发优先

在无线传感器网络中,一种常见的通信模式是源节点发送的数据,经由多个中间节点转发至汇聚节点。由于转发节点的冲突或竞争信道失败会导致数据前传中断,从而增加传输延时。为此,在 PTTL 退避算法中,增加了转发优先的策略,即当传感器节点(除汇聚节点以外的转发节点)接收到 RTS 信息后,直接将自己的退避窗口设置为最小值,提高其作为下一跳的发送节点的竞争信道能力,保证多跳数据前传的连续性。

3) PTTL 算法描述

用 CW_{init} 代表传感器节点的初始竞争窗口; i 代表节点连续侦听到的空闲时隙个数; s 代表节点连续成功竞争信道,并成功发送报文的次数; c 代表节点连续竞争信道失败的退避次数,PTTL 算法可以描述如下:

```

CW = CWinit ;//初始竞争窗口
if the node listens an idle slot
then
CW = max(CWmin, CW - i3) ;//连续侦听到 i 个空闲 slot
if the node sends a package successfully
then
CW = max(CWmin, CW - s2) ;//连续 s 次成功竞争信道并发送报文
if the node fails to access the channel
then
if c <= cmax then
CW = min(CWmax, CW × (c + 1)) ;//连续 c 次竞争信道失败
else
CW = CWinit ;//超过最大退避次数
if the node receives RTS
then
CW = CWmin ;//赋予转发节点最小竞争窗口

```

3 PTTL 算法性能分析

应用离散状态的 Markov 模型^[16]对 PTTL 退避算法在信道非空闲状态下的性能进行分析。

同文献[17]一样,有如下假设:

a) 假设有 n 个传感器节点在竞争同一无线信道,各节点均有连续的数据包等待发送,即各节点的发送队列始终非空;

b) 设 p 代表节点尝试接入时信道忙的概率, 假设 p 恒定, 且与数据包所处的退避阶段不相关, 即节点每一次的退避概率与之前的退避次数无关 (这是基于无线传感器网络节点密度大、数量众多的特性)。

令 $s(t)$ 取正值时表示节点在 t 时刻的退避次数的随机过程, 取负值时表示节点在 t 时刻连续竞争信道成功次数的随机过程, 其状态空间为 $[-s, -s+1, \dots, 0, 1, 2, \dots, m]$, $CW_{\max} = CW_{\text{init}} \times (m+1)!$, $CW_{\min} = CW_{\text{init}} - s^2$; 令 $b(t)$ 表示节点在退避阶段中 t 时刻退避计数器的值的随机过程, 其状态空间为 $[0, 1, 2, \dots, CW_{\max}]$ 。其中 t 和 $t+1$ 表示两个相邻时隙的开始, 在每个时隙的开始, 节点的退避计数器减 1。令 W_i 表示节点在退避次数为 i 时的退避窗口, $W = CW_{\text{init}}$, 这样就可以建立一个二维离散时间 Markov 链: $\{s(t), b(t)\}$, 其随机状态转移情况如图 1 所示。

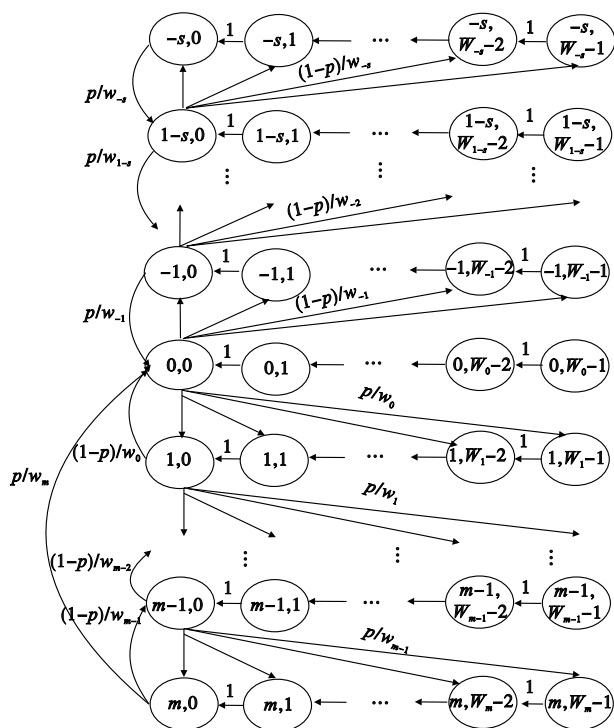


图1 二维Markov链 $\{s(t), b(t)\}$ 状态转移图

根据 PTTL 算法, 退避窗口 W_i 随退避次数 i 的变化函数为

$$W_i = \begin{cases} W \times (i+1)! & 0 < i \leq m \\ W - i^2 & -s \leq i \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

应用 $P\{i_1, k_1 | i_0, k_0\} = P\{s(t+1) = i_1, b(t+1) = k_1 | s(t) = i_0, b(t) = k_0\}$, 根据 PTTL 算法的退避过程, 可以得到 $\{s(t), b(t)\}$ 的非零一步转移概率为

$$\begin{cases} P\{i, k | i, k+1\} = 1 & -s \leq i \leq m, 0 \leq k \leq W_i - 2 \\ P\{i, k | i+1, 0\} = (1-p)/W_{i+1} & -s \leq i \leq 0, 0 \leq k \leq W_{i+1} - (1-i)^2 \\ P\{-s, k | -s, 0\} = (1-p)/W_{-s} & 0 \leq k \leq W_{-s} \\ P\{0, k | i, 0\} = (1-p)/W_i & 0 \leq i \leq m, 0 \leq k \leq W_i - 1 \\ P\{0, R | i, 0\} = p/W_i & -s \leq i < 0, 0 \leq k \leq 2W_i \\ P\{i+1, k | i, 0\} = p/W_i & 0 \leq i \leq m, 0 \leq k \leq W_i \times (i+1)! \\ P\{0, k | m, 0\} = p/W_m & 0 \leq k \leq W_{\text{init}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: 第1行是节点在退避过程中, 退避计数器随每个时隙的开始逐次减 1 的状态转移; 第2行是节点连续成功接入信道, 并且成功发送数据包的状态转移; 第3行是节点达到最大连续接入次数时, 再次成功接入信道的状态转移; 第4行是节点首次

成功接入信道, 并且成功发送数据包的状态转移; 第5行是节点在上一次成功接入信道, 而这次接入失败的状态转移; 第6行是节点连续接入信道失败的状态转移; 第7行是节点接入信道失败达到最大次数时, 再次接入失败的状态转移。

令 $b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}$, $k \in [0, W_i - 1]$, $i \in [-s, m]$ 为二维离散时间 Markov 链 $\{s(t), b(t)\}$ 的稳态分析。

根据式(2)有

$$\begin{cases} b_{i-1,0}p = b_{i,0} \rightarrow b_{i,0} = p^i b_{0,0} & 0 < i < m \\ b_{i+1,0}(1-p) = b_{i,0} \rightarrow b_{i,0} = (1-p)^{-i} b_{0,0} & -s < i \leq 0 \\ b_{m-1,0}p = b_{m,0}(1-p) \rightarrow b_{m,0} = \frac{p^m}{1-p} b_{0,0} \\ b_{-s+1}(1-p) = b_{-s,p} \rightarrow b_{-s,0} = \frac{(1-p)^s}{p} b_{0,0} \end{cases} \quad (3)$$

对每个 $k \in (0, W_i - 1)$, 有

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{i,0} \quad i \in (-s, m), k \in (0, W_i - 1)$$

$b_{0,0}$ 可以由下面的等式推出:

$$1 = \sum_{i=-s}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=-s}^m b_{i,0} \frac{W_i + 1}{2} = \frac{p^m}{1-p} \times b_{0,0} \times W(m+1)! + \frac{(1-p)^s}{p} \times b_{0,0} \times (W - s^2) + \sum_{i=1}^{m-1} p^i \times b_{0,0} \times W(i+1)! + \sum_{i=-s}^0 (1-p)^{-i} \times b_{0,0} \times (W - i^2)$$

令 $x_1 = \sum_{i=1}^{m-1} p^i W(i+1)!$, $x_2 = \sum_{i=-s}^0 (1-p)^{-i} (W - i^2)$, 代入可得

$$b_{0,0} = \frac{p(1-p)}{p^{m+1} W(m+1)! + (1-p)^{s+1} (W - s^2) + p(1+p)(x_1 + x_2)} \quad (4)$$

现在可以表示出节点在任意时隙内发送数据概率, 此时不考虑退避阶段, 设发送概率为 τ , 可得

$$\tau = \sum_{i=-s}^m b_{i,0} = b_{0,0} \frac{1-p(1-p)}{p(1-p)} = \frac{1-p(1-p)}{p^{m+1} W(m+1)! + (1-p)^{s+1} (W - s^2) + p(1+p)(x_1 + x_2)} \quad (5)$$

如果除了当前节点发送数据外, 其他的 $n-1$ 个节点中也有数据发送, 这样就会产生冲突, 假设每个节点的发送概率都为 τ , 那么在一个时隙内发生冲突的概率为

$$p = 1 - (1-\tau)^{n-1} \quad (6)$$

等式(5)(6)表示的是两个未知数 p 和 τ 的非线性系统, 可以通过数值方法解出。一旦解出 τ , 就可导出系统吞吐量。

设 P_{tr} 表示一个时隙中至少存在着一个通信业务的概率。

$$P_{tr} = 1 - (1-\tau)^n$$

设 P_s 表示在至少存在着一个通信业务的情况下, 数据发送成功的概率。

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1 - (1-\tau)^n}$$

设 $E[P]$ 是数据包的平均有效长度, 那么成功发送的数据长度为 $P_{tr} P_s E[P]$, 这样可以得到吞吐量 S 为 (同文献[17])

$$S = \frac{P_s P_{tr} E[P]}{(1-P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr} (1-P_s) T_c} \quad (7)$$

其中: T_s 是信道在一个时隙内处于忙状态的平均时间, 也即成功发送数据占用信道的平均时间; T_c 是发生冲突后等待信道重新空闲的平均时间, 可以认为 $T_s = T_c$; σ 是一个空闲时隙的长度。

根据上述的理论分析和公式, 代入表 1 中的参数值, 可以计算出 PTTL 算法在理论上的吞吐量随节点 n 变化情况, 如图

2所示。

表1 PTTL算法参数

Parameters	Values	Parameters	Values
radio bandwidth	128 kbps	propagation delay	1 μ s
packet payload	1 KB	slot timer	50 μ s
ACK	16 Byte	ACK_Timeout	300 μ s
RTS	20 Byte	CTS_Timeout	300 μ s
CTS	14 Byte		

4 仿真与结果

仿真实验平台采用 NS2 V2.30, 将 IEEE 802.11 的 BEB 算法和改进的 MILD 算法作为参考算法进行了比较。

在 $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$ 的方形区域内部署了 50 个传感器节点, 从 0~49 进行编号, 并且设置节点 49 为唯一汇聚节点。仿真开始时, 没有发送节点, 以后每 2 s 增加一个发送节点, 发送节点的发包间隔为 300 ms、1 s 和 5 s。其他参数取值如表 1。

对 BEB 算法, 最小和最大竞争窗口选取了标准的 31 和 1024; 对 MILD 算法和本文提出的 PTTL 算法, 最小和最大竞争窗口分别选取 8 和 512, 其中 MILD 算法中的 $\alpha = 1.5$, $\beta = 1$, 初始窗口都是 128。最大竞争失败次数是 3 次。

文献[17,18]中指出, 网络吞吐量会随节点数的增多而下降, 原因在于节点数越多, 发生冲突的概率就越大。仿真采用增加发送节点数量来进一步考察这一性能特点。图 3 显示了分别使用三种退避算法时, 网络吞吐量随发送节点的增多而改变的情况。发送节点数从 2 增加到 48, 可以看到三种算法的吞吐量都在近似线性地减小, PTTL 算法的吞吐量减小得最慢。这是因为, 在发送节点数较少时, 发送成功率较高, 但是 BEB 算法中节点的竞争窗口大多都是最小值, 冲突概率较高; 而 MILD 的竞争窗口以数值 1 递减, 增加了退避延时; PTTL 算法中的竞争窗口以连续发送成功次数的平方数递减, 能够很快地适应低负载, 且其转发优先机制使得转发节点能以较大概率传递数据包。从图中还可以看到, 系统吞吐量的仿真结果同上节的理论分析结果相近。

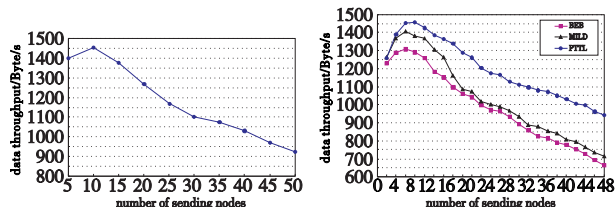


图2 PTTL算法下系统吞吐量的理论值

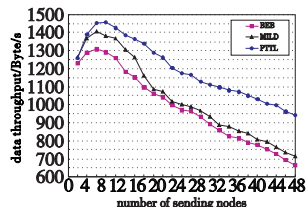


图3 发送节点递增下的网络吞吐量

考察三种退避算法下数据包的重传次数可以较为直观地看出节点冲突的情况。如图 4 所示, 随着发送节点数目的增多, 网络负载增大, 数据包重传次数也在增多。其中, 使用 BEB 算法时包重传次数最多, 增长速度也最快; 使用 PTTL 算法时包重传次数最少, 且增长速度也最慢, 因而 PTTL 算法对网络负载的适应性较强。

最后考察不同的退避算法对通信效率的影响。图 5 显示了在发送节点递增时数据包的平均传输延时。可以看到, 在负载不断增大的情况下, 这三种算法的平均传输延时都在增大。其中, BEB 算法增长得较快, 其次是 MILD 算法, PTTL 算法的

平均传输延时最小。这是因为 PTTL 算法中的竞争窗口滑动速度较快, 能较快地适应不同的负载情况, 并且其转发节点具有最优信道竞争能力, 使得单数据包的接收和转发较为连续。

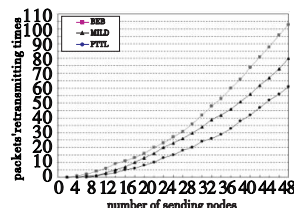


图4 发送节点递增下的平均包重传次数

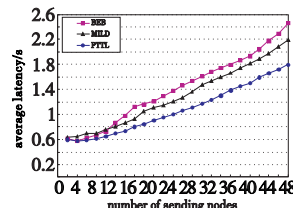


图5 发送节点递增下的平均包传输延时

5 结束语

本文在现有退避算法的基础上, 针对无线传感器网络的特点, 提出了一种基于转发优先和流量分级的退避算法。通过由节点自身侦听到的网络信息, 将网络流量判定为不同的级别, 根据流量级别来改变退避窗口的大小; 同时赋予转发节点一定的信道竞争优势。通过理论分析和仿真实验表明, 该算法可以带来较大的系统吞吐量, 较好地减少节点冲突, 提高多跳通信的传输效率, 对网络流量的变化具有较强的适应性, 可以适用于无线传感器网络的 MAC 协议。

参考文献:

- [1] 许雪梅. 解决隐终端和暴露终端问题的几种方法[J]. 无线电通信技术, 2004, 30(5): 32-33.
- [2] WEI Ye, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2002:1567-1576.
- [3] 李瑞芳, 李仁发. 网络信道接入退避算法研究[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(5): 2358-2363.
- [4] 郑相全. 无线自组网技术实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [5] GOODMAN J, GREENBER A G, MADRAS N, et al. Stability of binary exponential backoff[J]. Journal of the ACM, 1988, 35(3): 579-602.
- [6] BHARGHAVAN V, DEMERS A, SHENKER S. MACAW: a media access protocol for wireless LANs[C]//Proc of ACM SIGCOMM'94. New York: ACM, 1994: 212-225.
- [7] AAD I, NI Qiang, BARAKAT C, et al. Enhancing IEEE 802. 11 MAC in congested environments[J]. Computer Communications, 2004, 28(14): 1605-1617.
- [8] WU H, CHENG S, PENG Y, et al. IEEE 802. 11 distributed coordination function (DCF): analysis and enhancement[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. 2002: 605-609.
- [9] SONG N, KWAK B, SONG J, et al. Enhancement of IEEE 802. 11 distributed coordination function with exponential increase exponential decrease backoff algorithm[C]//Proc of IEEE VTC. 2003: 2775-2778.
- [10] PANG Q X, LIEW S C, LEE J Y B, et al. Performance evaluation of an adaptive back off scheme for WLAN[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2004, 4(8): 867-879.
- [11] LI Tai-jun, TANG Tie-bin, CHANG Cheng. A new backoff algorithm for the IEEE 802. 11 distributed coordination function[C]//Proc of FSKD. 2009: 455-459.

(上接第 1849 页)

- [12] QIAO Da-ji, SHIN K G. Achieving efficient channel utilization and weighted fairness for data communications in IEEE 802. 11 WLAN under the DCF[C]//Proc of IEEE IWQoS'02. 2002:227-236.
- [13] 何宏,李建东,盛敏,等. 一种基于慢退避思想的 SD_DCC 退避算法及其性能分析[J]. 计算机学报,2005,28(11):1907-1914.
- [14] BONONI L, CONTI M, DONATIello L. Design and performance evaluation of a distributed contention control (DCC) mechanism for IEEE 802. 11 wireless local area networks[C]//Proc of WOWMOM. 1998:59-67.

- [15] KHAN B M, ALO F H, STIPIDIS E. Improved backoff algorithm for IEEE 802. 15. 4 wireless sensor networks[C]//Proc of IFIP Wireless Days. 2010.
- [16] 胡迪鹤. 随机过程论:基础、理论、应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005.
- [17] BINACHI G. Performance analysis of the IEEE 802. 11 distributed coordination function[J]. IEEE Journal on Selected Areas,2000,18(3):535-547.
- [18] TAY Y C, CHUA K C. A capacity analysis for the IEEE 802. 11 MAC protocol[J]. Wireless Networks,2001,7(2):159-171.